

Известия вузов Цветная металлургия

Izvestiya Non-Ferrous Metallurgy

ISSN 0021-3438
eISSN 2412-8783



НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ
ОСНОВАН В 1958 Г.
ВЫХОДИТ 4 РАЗА В ГОД

<https://cvmet.misis.ru>

Журнал публикует статьи работников вузов, НИИ, РАН и промышленности России, стран СНГ, а также зарубежных авторов, содержащие новые результаты научно-исследовательских работ, обзорные статьи проблемного характера по следующим разделам:

- Обогащение руд цветных металлов
- Металлургия цветных металлов
- Металлургия редких и благородных металлов
- Литейное производство
- Обработка металлов давлением
- Металловедение и термическая обработка
- Коррозия и защита металлов
- Энерго- и ресурсосбережение



Учредителем журнала является НИТУ МИСИС. Издание ориентировано на широкий круг специалистов – металлургов, материаловедов, физиков, химиков

В редакционную коллегию входят известные отечественные и зарубежные ученые. Регулярное ознакомление с публикуемыми в журнале материалами позволит Вам быть в курсе новинок металлургии, полнее использовать на практике достижения и опыт своих коллег.

Журнал включен в перечень научных журналов, рекомендованных ВАК Минобрнауки РФ для публикации результатов диссертаций на соискание ученых степеней.

Журнал включен в базы данных: *Scopus*, *Russian Science Citation Index (RSCI)*, *Ulrich's Periodicals Directory*, РИНЦ, БД/РЖ ВИНТИ.

Адрес: 119049, Москва, Ленинский пр-т, 4, стр. 1
НИТУ МИСИС,
редакция журнала
«Известия вузов. Цветная металлургия»

Тел.: +7 (495) 638-45-35
Эл. почта: izv.vuz@misis.ru

Журнал выходит 1 раз в 3 месяца
и распространяется на всей территории России

Подписка на журнал в печатной
и электронной формах осуществляется
через редакцию и агентство «Урал-Пресс»
(www.ural-press.ru)

ISSN 0021-3438 (Print)
ISSN 2412-8783 (Online)

ИЗВЕСТИЯ ВУЗОВ
ЦВЕТНАЯ
МЕТАЛЛУРГИЯ

Том 30, № 1, 2024

Научно-технический журнал
Основан в 1958 г.
Выходит 4 раза в год

IZVESTIYA
NON-FERROUS
METALLURGY

Vol. 30, No. 1, 2024

Scientific and Technical Journal
Founded in 1958
4 Issues per year

ИЗВЕСТИЯ ВУЗОВ

ЦВЕТНАЯ МЕТАЛЛУРГИЯ

ISSN 0021-3438 (Print)

ISSN 2412-8783 (Online)

Том 30, № 1

2024

Научно-технический журнал Основан в 1958 г. Выходит 4 раза в год <http://cvmet.misis.ru>

Журнал включен в Перечень рецензируемых научных изданий, рекомендованных ВАК Минобрнауки РФ
для публикации результатов диссертаций на соискание ученых степеней

Журнал включен в базы данных: Russian Science Citation Index (RSCI), Chemical Abstracts (Online), INIS, OCLC ArticleFirst,
Ulrich's Periodicals Directory, РИНЦ, БД/РЖ ВИНТИ

Учредитель



ФГАОУ ВО Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС»
Адрес: 119049, г. Москва, Ленинский пр-т, 4, стр. 1
<http://www.misis.ru>

Главный редактор

Евгений Александрович Левашов
д.т.н., академик РАЕН, профессор, НИТУ МИСИС, г. Москва

Заместитель главного редактора

Владислава Анатольевна Игнаткина
д.т.н., профессор, НИТУ МИСИС, г. Москва

Редакционная коллегия

Е.В. Агеев — д.т.н., ЮЗГУ, г. Курск
М.В. Ананьев — д.х.н., АО «Гиредмет», г. Москва
Н.А. Белов — д.т.н., проф., НИТУ МИСИС, г. Москва
Е.В. Богатырева — д.т.н., НИТУ МИСИС, г. Москва
Г.М. Вольдман — д.х.н., проф., РТУ (МИТХТ), г. Москва
Ф.В. Гречников — д.т.н., акад. РАН, проф., СНИУ, г. Самара
Д.В. Гундеров — д.ф.-м.н., ИФМК УНЦ РАН, г. Уфа
В.Б. Деев — д.т.н., проф., НИТУ МИСИС, г. Москва
В.М. Денисов — д.х.н., проф., СФУ, г. Красноярск
Д.В. Дробот — д.х.н., проф., РТУ (МИТХТ), г. Москва
Ю.П. Зайков — д.х.н., проф., ИВТЭ УрО РАН, г. Екатеринбург
Р.Х. Залавутдинов — к.ф.-м.н., ИФХЭ РАН, г. Москва
С.В. Мамяченков — д.т.н., проф., УрФУ, г. Екатеринбург
З.А. Мансуров — д.х.н., проф., Институт проблем горения,
г. Алматы, Казахстан
Н.В. Немчинова — д.т.н., проф., ИРНИТУ, г. Иркутск
К.В. Никитин — д.т.н., проф., СамГТУ, г. Самара
П.В. Поляков — д.х.н., проф., СФУ, г. Красноярск
Е.С. Прусов — к.т.н., доцент, ВлГУ, г. Владимир
В.Н. Рычков — д.х.н., проф., УрФУ, г. Екатеринбург
Г.А. Салищев — д.т.н., проф., НИУ «БелГУ», г. Белгород
В.М. Сизяков — д.т.н., проф., СПбГУ, г. Санкт-Петербург

Б.Б. Страумал — д.ф.-м.н., проф., ИФТТ РАН, г. Черноголовка
О.Ю. Ткачева — д.х.н., ИВТЭ УрО РАН, г. Екатеринбург
Б.Б. Хина — д.ф.-м.н., доц., ФТИ НАН Беларуси,
г. Минск, Беларусь
Д.В. Штанский — д.ф.-м.н., проф., НИТУ МИСИС, г. Москва
Abhilash — Dr., Ph.D., CSIR — National Metallurgical Laboratory,
Jamshedpur, India
D.V. Louzguine — Prof., Dr., Tohoku University, Sendai, Japan
H.A. Oye — Prof., Dr., Norwegian University of Science and Technology,
Trondheim, Norway
D. Sadoway — Prof., Dr., Massachusetts Institute of Technology,
Boston, USA
Stopic Srecko — Dr.-Ing. habil., RWTH Aachen University,
Aachen, Germany
M. Verhaege — Prof., Dr., University of Gent, Belgium
G. Xanthopoulou — Dr., National Center for Scientific Research
«Demokritos», Agia Paraskevi, Attica, Greece
A.L. Yerokhin — Prof., Dr., University of Manchester, United Kingdom
Yücel Onuralp — Prof., Dr., Istanbul Technical University, Maslak,
Istanbul, Turkey
M. Zinigrad — Prof., Dr., Ariel University, Ariel, Israel
A.I. Zouboulis — Prof., Dr., Aristotle University of Thessaloniki, Greece

Редакция журнала

Адрес: 119049, г. Москва, Ленинский пр-т, 4, стр. 1,
НИТУ МИСИС
Тел.: +7 (495) 638-45-35
E-mail: izv.vuz@misis.ru

Свидетельство о регистрации № 015842 от 13.03.1997 г.
Перерегистрация ПИ № ФС77-79229 от 25.09.2020 г.

Подписка: Агентство «Урал-пресс»

Ведущий редактор — О.В. Соснина
Выпускающий редактор — А.А. Кудинова
Дизайн и верстка — Е.А. Легкая

Подписано в печать 25.03.2024. Формат 60×90 1/8.
Бум. офсетная № 1. Печать цифровая. Усл. печ. л. 11,5
Заказ 19451. Цена свободная

Отпечатано в типографии Издательского Дома МИСИС
119049, г. Москва, Ленинский пр-т, 4, стр. 1. Тел./факс: +7 (499) 236-76-17



© НИТУ МИСИС, Москва, 2024
© «Известия вузов. Цветная металлургия», 2024



Статьи доступны под лицензией Creative Commons
Attribution Non-Commercial No Derivatives

IZVESTIYA

NON-FERROUS METALLURGY

ISSN 0021-3438 (Print)

ISSN 2412-8783 (Online)

Vol. 30, No. 1
2024

Scientific and Technical Journal

Founded in 1958

4 Issues per year

<http://cvmet.misis.ru>

Journal is included into the List of the peer-reviewed scientific publications recommended by the Highest Attestation Commission of the Ministry of Education and Science of the Russian Federation for publishing the results of doctoral and candidate dissertations

Abstracting/Indexing: Russian Science Citation Index (RSCI), Chemical Abstracts (Online), INIS, OCLC ArticleFirst, Ulrich's Periodicals Directory, VINITI Database (Abstract Journal)

Founder



National University of Science and Technology "MISIS"

Address: 4 build. 1 Leninskiy Prosp., Moscow 119049, Russia

<http://www.misis.ru>

Editor-in-Chief

Evgeny A. Levashov

Prof., Dr. Sci. (Eng.), Acad. of the RANS, NUST MISIS, Moscow, Russia

Deputy Editor

Vladislava A. Ignatkina

Prof., Dr. Sci., NUST MISIS, Moscow, Russia

Editorial Board

Abhilash – Dr., Ph.D., CSIR – National Metallurgical Laboratory, Jamshedpur, India
E.V. Ageev – Prof., Dr. Sci. (Eng.), SouthWest State University, Kursk, Russia
M.V. Ananyev – Prof., Dr. Sci. (Chem.), Federal State Research and Development Institute of Rare Metal Industry (JSC "Giredmet"), Moscow, Russia
N.A. Belov – Prof., Dr. Sci. (Eng.), NUST MISIS, Moscow, Russia
E.V. Bogatyreva – Prof., Dr. Sci. (Eng.), NUST MISIS, Moscow, Russia
V.B. Deev – Prof., Dr. Sci. (Eng.), NUST MISIS, Moscow, Russia
V.M. Denisov – Prof., Dr. Sci. (Chem.), Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia
D.V. Drobot – Prof., Dr. Sci. (Chem.), Russian Technological University (MITHT), Moscow, Russia
F.V. Grechnikov – Prof., Dr. Sci. (Eng.), Acad. of RAS, Samara National Research University n.a. S.P. Korolev (Samara University), Samara, Russia
D.V. Gunderov – Dr. Sci. (Phys.-Math.), Institute of Molecule and Crystal Physics Ufa Research Center of the RAS, Ufa, Russia
B.B. Khina – Dr. Sci. (Phys.-Math.), The Physical-Technical Institute of NAS of Belarus, Minsk, Belarus
D.V. Louzguine – Prof., Dr. Sci., Tohoku University, Sendai, Japan
S.V. Mamychenkov – Prof., Dr. Sci. (Eng.), Ural Federal University, Yekaterinburg, Russia
Z.A. Mansurov – Dr. Sci. (Chem.), Prof., Institute of Combustion Problems, Almaty, Kazakhstan
N.V. Nemchinova – Prof., Dr. Sci. (Eng.), Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia
K.V. Nikitin – Prof., Dr. Sci. (Eng.), Samara State Technical University, Samara, Russia
H.A. Oye – Prof., Dr., Norwegian University of Science and Technology, Trondheim, Norway
P.V. Polyakov – Prof., Dr. Sci. (Chem.), Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia

E.S. Prusov – Cand. Sci. (Eng.), Vladimir State University, Vladimir, Russia
V.N. Richkov – Prof., Dr. Sci. (Chem.), Ural Federal University, Ekaterinburg, Russia
D. Sadoway – Prof., Dr., Massachusetts Institute of Technology, Boston, USA
G.A. Salishchev – Prof., Dr. Sci. (Eng.), Belgorod National Research University, Belgorod, Russia
D.V. Shtansky – Prof., Dr. Sci. (Phys.-Math.), NUST MISIS, Moscow, Russia
V.M. Sizyakov – Prof., Dr. Sci. (Eng.), Saint-Petersburg Mining University, St. Petersburg, Russia
Stopic Srecko – Dr.-Ing. habil., RWTH Aachen University, Aachen, Germany
B.B. Straumal – Prof., Dr. Sci. (Phys.-Math.), Institute of Solid State Physics of the RAS, Chernogolovka, Moscow region
O.Yu. Tkacheva – Dr. Sci. (Chem.), Institute of High Temperature Electrochemistry of the Ural Branch of the RAS, Yekaterinburg, Russia
M. Verhaege – Prof., Dr., University of Gent, Belgium
G.M. Vol'dman – Prof., Dr. Sci. (Chem.), Russian Technological University (MITHT), Moscow, Russia
G. Xanthopoulou – Dr., National Center for Scientific Research "Demokritos", Agia Paraskevi, Attica, Greece
A.L. Yerokhin – Prof., Dr., University of Manchester, United Kingdom
Onuralp Yücel – Prof., Dr., Istanbul Technical University, Maslak, Istanbul, Turkey
Yu.P. Zaikov – Prof., Dr. Sci. (Chem.), Institute of High Temperature Electrochemistry of the Ural Branch of the RAS, Yekaterinburg, Russia
R.Kh. Zalavutdinov – Cand. Sci. (Phys.-Math.), A.N. Frumkin Institute of Physical Chemistry and Electrochemistry of the RAS, Moscow, Russia
M. Zinigrad – Prof., Dr., Ariel University, Ariel, Israel
A.I. Zouboulis – Prof., Dr., Aristotle University of Thessaloniki, Greece

Editorial Staff

Address: NUST MISIS, 4 build. 1 Leninskiy Prosp., Moscow 119049, Russia

Phone: +7 (495) 638-45-35

E-mail: izv.vuz@misis.ru

Certificate of registration No. 015842 (13.03.1997)

Re-registration PI No. ФC77-79229 (25.09.2020)

Subscription: Ural-Press Agency



© NUST MISIS, Moscow, 2024

© Izvestiya. Non-Ferrous Metallurgy, 2024

Leading Editor – O.V. Sosnina

Executive Editor – A.A. Kudinova

Layout Designer – E.A. Legkaya

Signed print 25.03.2024. Format 60×90 1/8.

Offset paper No. 1. Digital printing. Quires 11,5

Order 19451. Free price

Printed in the printing house of the MISIS Publish House

4 build. 1 Leninskiy Prosp., Moscow 119049, Russia. Phone/fax: +7 (499) 236-76-17



Articles are available under Creative Commons Attribution Non-Commercial No Derivatives

Металлургия цветных металлов

- 5 Зелях Я.Д., Тимофеев К.Л., Воинков Р.С.,
Мальцев Г.И., Шунин В.А.

Очистка технологических растворов
от ртути сорбцией

Металлургия редких и благородных металлов

- 14 Никишина Е.Е., Грецишников Н.В., Дробот Д.В.

Гетерофазный синтез цирконатов редкоземельных
элементов

Литейное производство

- 24 Санин В.В., Агеев М.И., Логинов П.А.,
Бычкова М.Я., Шукман Е.С., Межевая Л.Ю.,
Санин В.Н., Лобова Т.А.

Особенности структуры и свойства жаропрочных
никелевых β -сплавов, полученных
методом центробежного СВС-литья

Металловедение и термическая обработка

- 42 Славинская Н.А., Ри Х., Ри Э.Х., Живетьев А.С.

Влияние температурных режимов закалки
на формирование структуры, ликвационные
процессы и свойства сплава AM4,5Kd + 0,2 мас.% La
после искусственного старения

- 55 Федотов А.Д., Муканов С.К., Романенко Б.Ю.,
Логинов П.А., Бычкова М.Я., Рупасов С.И.

Механические и трибологические свойства
высокоэнтропийных сплавов $\text{CoCrCu}_x\text{FeNi}_2$
с высоким содержанием никеля

- 70 Каясова А.О., Басков Ф.А., Лобова Т.А., Левашов Е.А.

Особенности структуры и механические свойства
стали ПР-03N18K9M5TYu, полученной методом
селективного лазерного сплавления в сочетании
с постобработкой

- 81 Гундеров Д.В., Стоцкий А.Г., Гундерова С.Д.,
Аубакирова В.Р., Демин А.Ю.

Влияние РКУП при температуре 300 °C
на структуру и свойства закаленного
сплава Zr–2,5%Nb

Metallurgy of Non-Ferrous Metals

- 5 Zelyakh Ya.D., Timofeev K.L., Voinkov R.S.,
Maltsev G.I., Shunin V.A.

Purification of process solutions
from mercury by sorption

Metallurgy of Rare and Precious Metals

- 14 Nikishina E.E., Grechishnikov N.V., Drobot D.V.

Heterophase synthesis of rare-earth
zirconates

Foundry

- 24 Sanin V.V., Aheiev M.I., Loginov P.A., Bychkova M.Ya.,
Shukman E.S., Mezhevaia L.Yu., Sanin V.N.,
Lobova T.A.

Structural characteristics and properties
of heat-resistant nickel β -alloys produced
via the centrifugal SHS-casting method

Physical Metallurgy and Heat Treatment

- 42 Slavinskaya N.A., Ri H., Ri E.H., Zhivetev A.S.

Effects of quenching temperature
on the structure, segregation, and properties
of the AM4.5Kd + 0.2 wt.% La alloy
after artificial aging

- 55 Fedotov A.D., Mukanov S.K., Romanenko B.Yu.,
Loginov P.A., Bychkova M.Ya., Rupasov S.I.

Mechanical and tribological characteristics
of nickel-rich $\text{CoCrCu}_x\text{FeNi}_2$
high entropy-alloys

- 70 Kayasova A.O., Baskov F.A., Lobova T.A., Levashov E.A.

Structure and mechanical properties
of PR-03N18K9M5TYu steel
grade fabricated by selective laser melting
and post-processing

- 81 Gunderov D.V., Stotskiy A.G., Gunderova S.D.,
Aubakirova V.R., Demin A.Yu.

Impact of ECAP at 300 °C on the microstructure
and mechanical properties of the quenched
Zr–2.5%Nb alloy